

異なる河床勾配を有する常流分岐水路の水理特性

HYDRAULIC PROPERTY OF A BIFURCATED CHANNEL SYSTEM
UNDER SUB CRITICAL FLOW CONDITION WITH DIFFERENT BED SLOPES

北海道大学大学院 ○学生員 小林 賢也 (Kenya KOBAYASHI)
北海道大学大学院 フェロー 長谷川 和義 (Kazuyoshi HASEGAWA)
北海道大学工学部 学生員 守屋 薫 (Kaoru MORIYA)

1. はじめに

河川は様々な流路形態を持つが、その中の一つに流路の分岐がある。中州や島によって分岐する場合、また網状化のようにさらに複雑に分岐する場合もあれば、河床が周辺地表面高と近くなり大出水時において河道周辺地表材料が侵食され分岐河道を発生することもある。このように自然に分岐河道を有する河川の他にも、人口的に分岐河道を設けた河川も存在する。現在、北海道東部の標津川で試験的に行われている蛇行復元計画も分岐河道を対象としている。¹⁾ これはショートカットされた河川に本来の蛇行を取り戻そうとする試みであるが、計画高水流量を安全に流下させる要請からショートカットされた流路と蛇行していた旧流路を併用するものとなっている。近年の環境意識の高まりからも今後このようなケースも多くなるのではないと思われる。

分岐流に関してはこれまでに多くの研究がされている。長谷川ら²⁾は山地溪流における分岐流の閉塞現象に着目し、射流条件下の分岐部実験や運動量方程式による解析を行っている。長谷川らによれば射流が分岐する場合には流量配分比・水深などの解は4つ存在し分岐部流れが複数存在する。すなわち(1) 分岐した両水路ともに射流で流下する解、(2) 一方の水路で跳水が生じて、常流に接続し、他方が射流で流下する解、(3) (2)の状態が反対になる解、(4) 両水路ともに跳水が生じ常流で流下する解である。これらのそれぞれの場合において、流量配分比がことなっていることが注目される。目黒・長谷川ら³⁾⁴⁾は射流移動床条件における分岐部の流れを実験的に調べて、主流路が代わる代わる変化する交番現象を見出している。常流移動床条件では、Bolla, Repetto and Tubino⁵⁾が分岐部モデルによる安定解析を行っており、3つの解が存在することを示している。すなわち、彼らは等幅分岐水路について1次元運動方程式と流砂連続式を組み合わせ下流の分岐水路勾配が異なる場合の流量配分比を解き、(1)無次元掃流力がある値を超えるケースでは唯一の解が存在するが、(2)これを下まわるケースでは、3つの解が存在し、配分比が0.5に近い解はむしろ不安定である事を明らかにしている。興味深いことに勾配の緩い水路側に大きな流量が流れる解が現れやすい結果を示している。しかし、彼らは交互砂州が発生した場合には、その前進に対応して流量配分比が強く影響を受けるとしている。砂州の影響が無い場合における上述の複数解は、移動床水路においてのみ出現するものなのであろうか。

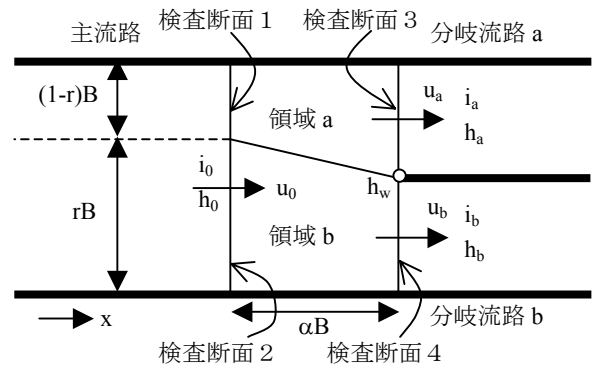


図-1 分岐部モデル

Bolla らはこのことについては検討していない。すなわち流れ自体のシステムが複数の解を持つか否かは不明のままである。

そこで本研究では常流固定床条件とし、分岐流路の勾配の差が与える流量配分比・水深への影響を、分岐モデルにおける運動量方程式の適用によって理論的に、また加えて実験により検討した。

2. 運動量解析モデル

2.1 分岐部モデルと検査領域

図-1のような幅 B の流路が、同幅で勾配のみが異なる分岐流路 a, b に分岐するモデルを考える。分岐の影響を受けない横断面を分岐部開始点より αB の距離とし、その断面より上流では流速 u_0 の一様流とする。分岐流路 a, b の分割流線は未知の流量配分比 r にしたがって上流流路幅を分け、分岐壁上端を結ぶものとした。なお分岐壁上端を w 点とし、その水深を h_w とする。検査領域、検査断面は図-1に示すとおりである。

2.2 運動量方程式

図-1の検査領域 a, b に x 方向の運動量方程式を適用すると以下ようになる。常流の場合、下流条件が上流に伝わるため、検査断面1, 3における水深 h_0 が分岐の影響を受けるものとして未知数となる。

なお、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 u_a, u_b : 検査断面3, 4での x 方向流速、 h_a, h_b : 検査断面3, 4での水深、 I_0, I_a, I_b : 主流路、分岐流路 a 、分岐流路 b での河床勾配、 V_a, V_b : 検査領域 a, b 内の水の体積、 T_{ax}, T_{bx} : 検査領域 a, b 内に働く x 方向の全摩擦力である。

$$\begin{aligned} & \rho u_a^2 h_a \frac{B}{2} - \rho u_0^2 h_0 (1-r) B = \frac{1}{2} \rho g h_0^2 (1-r) B \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \rho g h_0^2 + \frac{1}{2} \rho g h_w^2 \right) \left(r - \frac{1}{2} \right) B \\ & - \frac{1}{2} \rho g h_a^2 \frac{B}{2} + \rho g V_a i - T_{ax} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho u_b^2 h_b \frac{B}{2} - \rho u_0^2 h_0 r B = \frac{1}{2} \rho g h_0^2 r B \\ & - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \rho g h_0^2 + \frac{1}{2} \rho g h_w^2 \right) \left(r - \frac{1}{2} \right) B \\ & - \frac{1}{2} \rho g h_b^2 \frac{B}{2} + \rho g V_b i - T_{bx} \end{aligned} \quad (2)$$

また、連続の式は以下になる。

$$(1-r) B h_0 u_0 = \frac{B}{2} h_a u_a \quad (3)$$

$$r B h_0 u_0 = \frac{B}{2} h_b u_b \quad (4)$$

w 点の水深 h_w を h_a , h_b の平均で与え、重力項と摩擦項の和をゼロとし以上の関係を整理すると、以下の式を得る。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{r}{2} - \frac{3}{4} \right) h_a h_0^3 + \left\{ \frac{4q_0^2 (1-r)^2}{g} + \left(\frac{1}{8} - \frac{r}{4} \right) h_a^2 h_b \right. \\ & \left. + \left(\frac{1}{16} - \frac{r}{8} \right) h_a h_b^2 + \left(\frac{9}{16} - \frac{r}{8} \right) h_a^3 \right\} h_0 \\ & - \frac{2q_0^2 (1-r) h_a}{g} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{r}{2} - \frac{1}{4} \right) h_b h_0^3 + \left\{ \frac{4q_0^2 r^2}{g} + \left(\frac{r}{8} - \frac{1}{16} \right) h_a^2 h_b \right. \\ & \left. + \left(\frac{r}{4} - \frac{1}{8} \right) h_a h_b^2 + \left(\frac{7}{16} + \frac{r}{8} \right) h_b^3 \right\} h_0 \\ & - \frac{2rq_0^2 h_b}{g} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで q_0 ; 単位幅流量

なお、検査断面 3, 4 での水深 h_a , h_b は以下の式で与えられる等流水深で近似できるとする。

$$h_a = \left\{ \frac{2n(1-r)Q_0}{B\sqrt{i_a}} \right\}^{\frac{3}{5}} \quad (7)$$

$$h_b = \left\{ \frac{2nrQ_0}{B\sqrt{i_b}} \right\}^{\frac{3}{5}} \quad (8)$$

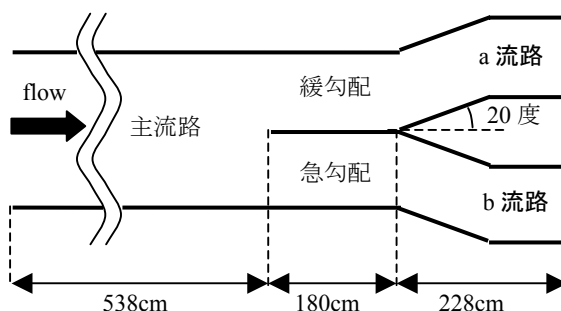


図-2 実験水路概略図

表-1 実験条件

	流量 Q (l/s)	a 流路 河床勾配 i_a	フルード数 F_r	無次元 掃流力 τ_*
Run.1-1	1.87	1/724	0.453	0.035
Run.1-2	2.84	1/724	0.416	0.049
Run.2-1	1.68	1/1110	0.453	0.032
Run.2-2	2.57	1/1110	0.524	0.039
Run.3-1	1.63	1/2448	0.378	0.036
Run.3-2	0.96	1/2448	0.360	0.026

(5)式(6)式を連立して解くことにより未知数である検査断面 1,2 での水深 h_0 , 流量配分比 r を求めることが出来る。

3. 固定床条件実験

3.1 実験概要

実験で使用した水路は図-2に示すような長さ946cm, 主流路幅70cm, の木製水路であり、水路中央を板で仕切ることによって流路を対称に分岐させた。主流路河床勾配およびb流路河床勾配は1/531であり、a流路河床勾配をb流路河床勾配に対して緩勾配とし、河床には粒径0.5mmの砂を一様に敷き詰めた。また実験条件は表-1に示すとおりである。なお固定床条件での実験を狙いとするために無次元掃流力 $\tau_* < 0.05$ となるよう流量を設定した。

本実験では左右分岐流路末端での採水による流量測定、ポイントゲージによる分岐部より上流1mでの水深の測定を行った。

3.2 実験結果

左右分岐流路末端における15分おきの採水により求めた流量の時間変化を図-3に示す。これらの図を見ると、いずれの場合においても緩勾配であるa流路の流量がb流路に比べて少なくなっているのが見て取れる。また、流量を時系列で見ていくと、流量計測時における誤差程度の変動はあるものの、流量に大きな変動はなく、流量配分比が時間とともに変化する現象は起きていない。本実験を見る限りでは固定床条件の場合における流量

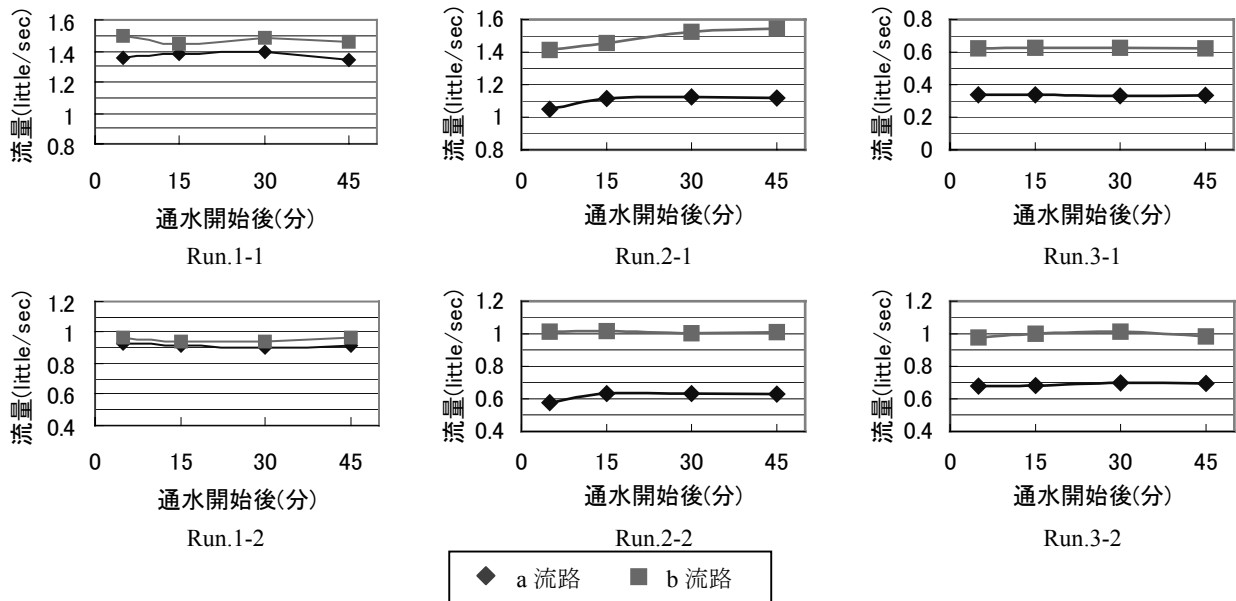


図-3 各実験における流量の時間変化

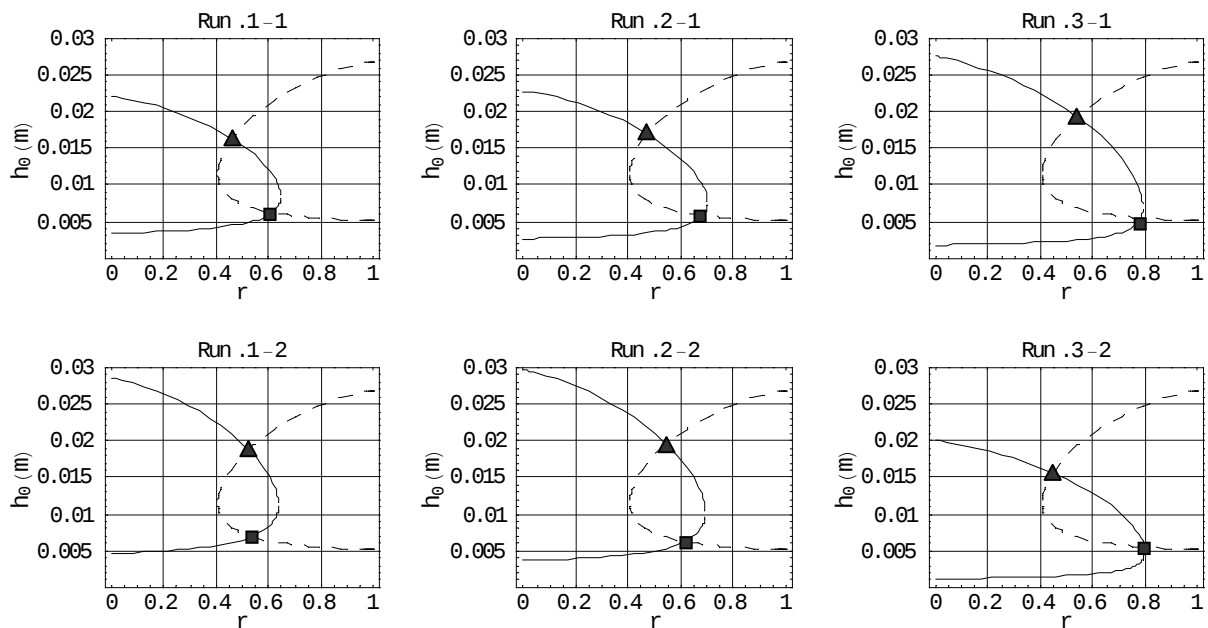


図-4 運動量方程式の解

配分比は一つしか存在せず、急勾配の流路側に流量が偏り、ある一定の流量配分比において流れが安定するのではないかと考えられる。

4. 実験結果と計算値の比較

4.1 運動量方程式の解

図-4は各実験条件ごとに(5)式における r , h_0 の解、(6)式における r , h_0 の解を $h_0 > 0$ の範囲についてプロットしたものである。(5)式の解を実線で、(6)式の解を破線で表した。両線が交わる点が運動量解析モデルによる r , h_0 の解となり、▲点が常流解に■点が射流解にそれぞれ対応している。同図から分かる通り、流量配分比は常流、

射流それぞれについて一つしか存在しない。これは複数の解が存在する移動床の場合とは異なる結果となっており、大変興味深い。

4.2 実験結果と計算値の比較

図-5は、流量配分比 r について、図-6は分岐の影響が及ばない断面での水深 h_0 について運動量方程式による計算値と実験値を比較したものである。図-5, 6より、計算値が実験値をおおむね再現できていることがわかり、本論文における運動量解析モデルが実現現象の傾向をつかめていると言える。また、同図より a 流路の河床勾配が緩やかになるほど b 流路への流量配分比 r が増加することが見て取れる。

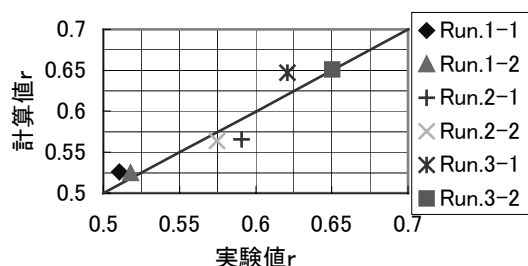


図-5 実験値と計算値の比較 (流量配分比)

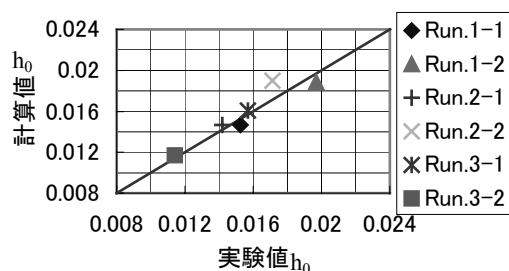


図-6 実験値と計算値の比較 (水深)

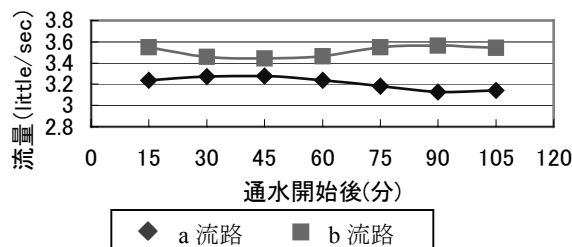


図-7 Run1-3 流量変化

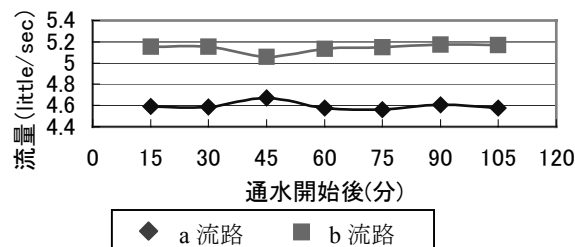


図-8 Run1-4 流量変化

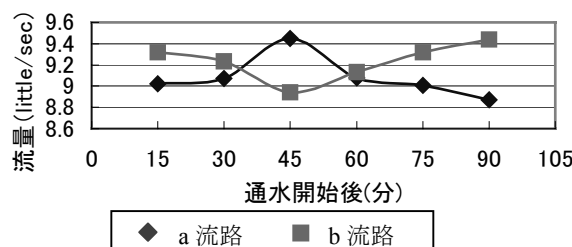


図-9 Run1-5 流量変化

表-2 移動床実験条件

	河床形態	流量 $Q(l/s)$	F_r	τ_*
Run1-3	交互砂州	6.72	0.512	0.057
Run1-4	複列砂州	9.74	0.642	0.083
Run1-5	Dune	18.31	0.765	0.113

流量配分比を求めることができ、急勾配流路に流量が偏ることが分かった。また実験によりその妥当性も証明できた。

3)移動床では複数ある流量配分比が固定床では一つしか存在しないことが分かった。

4)移動床では流量配分比の変動や交番現象が確認され、また交番の原因が交互砂州の影響だけでないことが分かった。

今後、今回の結果をふまえ、勾配差や流量、河床形態などがどのように流量配分比に影響を与えるのかを詳しく調べていきたい。

参考文献

- 1) 藤田将輝, 長谷川和義: 標津川蛇行通水時の堰をとまなう分岐流量配分比に関する研究, 水工学論文集, 第47巻, pp529-534, 2003.
- 2) 長谷川和義: 分岐部跳水が引き起こす土砂移動停止による山地河道の突然変動機構の解明, 平成5年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書, 1993.
- 3) 長谷川和義, 広瀬健治, 目黒嗣樹: 山地河川における分岐部流路交番現象に関する抽出実験とその解析, 水工学論文集, 第47巻, pp679-684, 2003.
- 4) 目黒嗣樹, 長谷川和義, 中村健作: 山地河川における分岐流路変動と土砂移動に関する実験的研究, 水工学論文集, 第46巻, pp755-760, 2002.
- 5) Bolla Pittaluga M., Repetto R. and Tubino M.: Channel Bifurcation In One-Dimensional Models: A Physically Based Nodal Point Condition, RCEM2001, pp305-314, 2001.

5. 移動床実験

固定床条件実験Run1-1,2と同様の河床勾配条件で流量のみを変えて行った移動床実験の結果を示す。実験条件は表-2の通りである。

流量の時間変化を示した図-7, 8, 9をみると、固定床条件の場合とは異なり、いずれも流量が振動していることが見て取れる。交互砂州が形成されたRun1-3、複列砂州が形成されたRun1-4では流量の振動は交番にまではいたっていない。しかし、Duneの形成されたRun1-5では流量の交番が確認された。一般に交番現象は交互砂州の前進による影響が強いとされてきたが、本実験により砂州が発生していない条件においても交番現象が確認された事は大変興味深いことである。交番現象には砂州の影響だけでなく、その他の要因、例えば分岐流路での流量配分比の違いによる侵食、堆積など分岐流のシステムとしての影響もあるのではないかと推測される。

6. おわりに

本研究により、異なる河床勾配を有する常流分岐流について、

1) 実験により、流量配分比が時間とともに変動する現象は確認されず固定床においてはある一定の流量配分比で流れが安定することが分かった。

2) 分岐モデルに運動量方程式を適用することで、未知の